

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

TRABAJO FIN DE GRADO



**ELIMINACIÓN DEL EFECTO DE LA
GRAVEDAD EN LAS MEDIDAS DE UN
SENSOR DE FUERZA-PAR**

*GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA*

Autor: Alejandro Lestón Figueiras

Tutor: David Álvarez Sánchez

Leganés, 24 de Septiembre de 2014



AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quería agradecer la gran ayuda de mi tutor, David Álvarez Sánchez, ayuda sin la cual finalizar este TFG hubiese sido mucho más que difícil. Gracias por estar ahí en cada duda que me surgía contestándola con una rapidez endiablada.

Un recuerdo también para todos los buenos profesores con los que he coincidido en la realización de este grado.

Agradecer también a mis amigos de toda la vida, Víctor y Sonry por estar en cada altibajo de mi etapa universitaria, vosotros tenéis parte de este título que con tanto esfuerzo he llegado a conseguir.

Gracias a mis compañeros de universidad Jaume, Left, Jorge, Oscar, Jesús y Stan, por vuestra compañía a lo largo de este recorrido y estoy seguro que a lo largo de mucho más.

A mi familia, aunque ellos ya lo saben, infinitas gracias, en especial, a abuela María por apoyarme y preocuparse por cómo me iba en cada momento, a mi madrina Lolo y a mis primos, Pe, Auro, Albertito y Benji, aunque para mí, sean más hermanos que primos.

Y ya por último, dar las gracias a mis padres, mamá y papá, muchas gracias de todo corazón por educarme como lo habéis hecho y por conseguir que terminara tanto esta carrera como otras muchas cosas en lo que llevo de vida. Sin vosotros no hubiera sido capaz.

Gracias a todos.



RESUMEN

Este Trabajo Final de Grado (TFG) está enmarcado en el proyecto Man Friendly Mobile Manipulator (MANFRED) desarrollado por el Grupo de Manipuladores Móviles del Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática en la Universidad Carlos III de Madrid (UC3M) [1].

El objetivo del mismo es la eliminación del efecto de la gravedad en las medidas de un sensor de fuerza/par JR3. El sensor está instalado en la última articulación del brazo manipulador robótico conocido como UC3M-LWR-1, entre la pinza o elemento terminal y el extremo del brazo. Realiza una lectura constante de datos en tiempo real de fuerza y par en los 3 ejes del manipulador móvil. Estos datos nos servirán para poder descartar la fuerza y par generados por la masa del elemento de sujeción del brazo, lo que nos facilitara la toma de medidas fuerza/par correctas de lo que el brazo robótico esté manipulando en ese momento.

Primero haremos una análisis de la plataforma experimental en la que nos encontramos, es decir, el manipulador móvil MANFRED, explicando los elementos de los cuales está compuesto el mismo y analizando el tipo de sensores que se utilizan en él, para posteriormente centrarnos en el sensor de la marca *JR3 inc.*

Explicaremos, mediante una muestra generada por el sistema de adquisición de datos, que tratamiento deben llevar los mismos para poder ser usados en la eliminación del efecto de la gravedad en las medidas del sensor.

Por último, y una vez tratados los datos de manera correcta, calcularemos el centro de masas (C.M.) del elemento de sujeción, de distintas maneras, lo que nos servirá para generar un algoritmo que se encargará de la compensación de la gravedad en el sensor, para que este pueda realizar medidas de fuerza y par sin un offset predeterminado por el peso del elemento de sujeción.



ABSTRACT

This bachelor thesis is framed in the Man Friendly Mobile Manipulator (MANFRED) project developed by the Group of Mobile Manipulators Department of Automatic Control and Systems Engineering at the UC3M [1].

The objective is to eliminate the gravity effect on the measures of the JR3 sensor force/torque. The sensor is installed in the last joint of the robotic manipulator arm known as UC3M-LWR-1, between the clamp element and the terminal element of the arm. This arm has to make a constant reading of force and torque in real time on the three axes of the mobile manipulator. These data will help us to rule out the force and torque generated by the mass of the holding element, which provide us a easy way to take a correct force and torque measures of the thing which is being manipulated by the robotic arm.

At first we will analyze the experimental platform on which we find ourselves, the mobile manipulator MANFRED, by explaining the elements of which is made it and analyzing the type of sensors used on it, after that, we focus on the sensor of the brand JR3 inc.

We will explain, by a sample generated by the data acquisition system, which treatment should have the sensor measurements to be used for removing the gravity effect on it.

Finally, we will calculate the position of the mass center of the clamping element, which will help us to generate an algorithm that will handle the gravity compensation in the sensor, ton enable it to perform measurements of force and torque without a predetermined offset produced by the weight of the clamping element.



ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	i
RESUMEN	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	vii
LISTADO DE ACRÓNIMOS.....	vii
1 CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN	2
1.1.1 Manipuladores móviles	3
1.1.2 Sensores de fuerza/par	4
1.2 MOTIVACIÓN.....	5
1.3 OBJETIVO	6
1.4 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	7
1.4.1 CAPÍTULO 1: Introducción.....	7
1.4.2 CAPÍTULO 2: Plataforma experimental.....	7
1.4.3 CAPÍTULO 3: Adquisición y tratamiento de los datos.....	7
1.4.4 CAPÍTULO 4: Eliminación del efecto de la gravedad.....	8
1.4.5 CAPÍTULO 5: Resultados y conclusiones	8
2 CAPÍTULO II: PLATAFORMA EXPERIMENTAL.....	9
2.1 MANFRED	10
2.1.1 Estructura del robot	11
2.1.2 Sistema sensorial	17
2.1.3 Sistema locomotor	22
2.1.4 Sistema de alimentación	23
2.1.5 Sistema manipulador UC3M-LWR-1.....	24
2.1.6 Sistema de procesamiento	25
2.1.7 Sistema de Control	26
2.2 SENSORES DE FUERZA.....	27
2.2.1 Sensores elásticos	27
2.2.2 Sensores piezorresistivos.....	28



2.2.3	Sensores capacitivos	28
2.2.4	Sensores piezoeléctricos	29
2.2.5	Sensores de la marca JR3 inc.	29
3	CAPÍTULO III: ADQUISICIÓN Y TRATAMIENTO DE DATOS.....	34
3.1	Adquisición de datos.....	35
3.1.1	Clasificación de datos	36
3.1.2	Ajuste de los datos	37
3.1.3	Ajuste de los ejes	38
3.1.4	Cálculo del vector gravedad en ejes del brazo	38
4	CAPÍTULO IV: Eliminación del efecto de la gravedad.....	41
4.1	Centro de masas	42
4.1.1	Cálculo matemático del C.M. de un sistema	42
4.1.2	Eliminación del efecto de la masa	44
4.1.3	Estimación de c mediante el análisis por mínimos cuadrados.....	46
5	CAPÍTULO V: RESULTADOS Y CONCLUSIONES	51
5.1	Resultados	52
5.2	Conclusiones	53
	BIBLIOGRAFÍA	54
	ANEXO A: PLANIFICACIÓN Y PRESUPUESTO	55
A.1.	Planificación y costes personales.....	55
A.2.	Costes materiales	56
A.3.	Costes totales	57



ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. MANFRED.....	2
FIGURA 2. A) MANIPULADOR ROBÓTICO OTILIO DE LA UC3M. B) ROBOT EXPLORADOR LUNAR. C) MANIPULADOR BRAZO ROBÓTICO DE ABB.	3
FIGURA 3. ROBOT TELEOPERADO UGV IROBOT PACKBOT 510.....	4
FIGURA 4. GRADOS DE LIBERTAD DEL BRAZO UC3M-LWR-1. B) BASE MÓVIL DE MANFRED.	10
FIGURA 5. ESQUEMA COMPLETO DE LOS EQUIPOS SITUADOS EN LA BASE MÓVIL	12
FIGURA 6. BRAZO MANIPULADOR LWR-UC3M-1.....	13
FIGURA 7. ESTRUCTURA DE LAS PARTES QUE FORMAN EL BRAZO MANIPULADOR LWR-UC3M-1.	14
FIGURA 8. VISTA LATERAL DE MAFRED, BASE MÓVIL Y EL TORSO FIJO.	16
FIGURA 9. SISTEMA SENSORIAL DE MANFRED.	17
FIGURA 10. TELÉMETRO LÁSER HOKUYO UTM-30LX.....	18
FIGURA 11. A) TELÉMETRO LÁSER BIDIMENSIONAL PLS DE SICK. B) RANGO DE ANÁLISIS DE 45 GRADOS GRACIAS AL SOPORTE DE SUJECCIÓN.....	19
FIGURA 12. A) CÁMARAS DE COLOR DE MANFRED. B) CÁMARA 3D DE MANFRED.	20
FIGURA 13. SENSOR FUERZA/PAR JR3.	21
FIGURA 14. ENCODER HED-550.	22
FIGURA 15. ESQUEMA DEL POSICIONAMIENTO DE LAS RUEDAS EN LA BASE MÓVIL.....	22
FIGURA 16. SISTEMA DE ALIMENTACIÓN MANFRED CON BATERÍAS PS-12450 B	23
FIGURA 17. BRAZO MANIPULADOR UC3M-LWR-1 CON 6 GDL.....	25
FIGURA 18. TARJETA CONTROLADORA PMAC2-PCI.	26
FIGURA 19. PARTES DE UN SENSOR ELÁSTICO.	27
FIGURA 20. SENSOR CAPACITIVO	29
FIGURA 21. SITUACIÓN DEL SENSOR JR3 EN EL BRAZO MANIPULADOR.....	31
FIGURA 22. A).B).C) TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS PCI BUS PN 1583 .D) TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS PCI BUS PN 1583 CON EL PUERTO ADSP-2184 EN DETALLE.	33
FIGURA 23. EJEMPLO DE OBTENCIÓN DE LOS DATOS DESDE LA TARJETA DE ADQUISICIÓN SIN TRANSFORMAR..	36
FIGURA 24. F_x , F_y Y F_z QUE NOS PROPORCIONA LA TARJETA DE ADQUISICIÓN.....	36
FIGURA 25. M_x , M_y Y M_z QUE NOS PROPORCIONA LA TARJETA DE ADQUISICIÓN.....	37
FIGURA 26. ROTACIÓN ANGULAR DE CADA UNO DE LOS MOTORES QUE NOS PROPORCIONA LA TARJETA DE ADQUISICIÓN.....	37



FIGURA 27. A) EJES PERTENECIENTES AL ALGORITMO DE MATLAB. B) EJES PERTENECIENTES A LOS DATOS OBTENIDOS CON LA TARJETA DE ADQUISICIÓN.	38
FIGURA 28. POSICIÓN Y ORIENTACIÓN DEL BRAZO ROBÓTICO DIBUJADA EN MATLAB.....	39
FIGURA 29. MATRIZ DE ORIENTACIÓN PARA LA POSICIÓN ESTUDIADA	40
FIGURA 30. COMPONENTES DE LA GRAVEDAD PARA LA POSICIÓN ESTUDIADA.....	40
FIGURA 31. POSICIÓN, ORIENTACIÓN Y MASAS PARA LA PRUEBA Y OBTENCIÓN DE RESULTADOS.	52

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. CARACTERÍSTICAS DEL BRAZO UC3M-LWR-1.....	15
TABLA 2. CARACTERÍSTICAS DEL TELÉMETRO LÁSER HOKUYO UTM-30LX	18
TABLA 3. CARACTERÍSTICAS DEL TELÉMETRO LÁSER BIDIMENSIONAL PLS DE SICK.....	19
TABLA 4. DESGLOSE DE LA PLANIFICACIÓN Y EL COSTE PERSONAL.	56
TABLA 5. COSTES MATERIALES.....	57
TABLA 6. RESUMEN DE LOS COSTES TOTALES.	57

LISTADO DE ACRÓNIMOS

TFG	Trabajo Fin de Grado
UC3M	Universidad Carlos III de Madrid
MANFRED	Man Friendly Mobile Manipulator
C.M.	Centro de Masas
GDL	Grados De Libertad



1 CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN



1.1 INTRODUCCIÓN

Este TFG se enmarca en el proyecto desarrollado por la UC3M de un robot manipulador móvil antropomórfico conocido como MANFRED (ver Figura 1) [2], y lo que buscamos es realizar una eliminación del efecto de la gravedad en las medidas de un sensor de fuerza/par JR3. El sensor está instalado en la última articulación del brazo manipulador robótico para así obtener una buena medición de los datos de fuerza, momentos y posición de cada uno de los motores del brazo.



Figura 1. MANFRED.

1.1.1 Manipuladores móviles

Un robot manipulador móvil antropomórfico (ver Figura 2.a) [3] consta de un brazo robótico manipulador de forma humana, de una base móvil en la que este se sostiene y de elementos electrónicos de control que le permiten coordinarse para conseguir moverse de manera eficaz a lo largo de sus grados de libertad (GDL) (8 en el caso del MANFRED). Un manipulador debe realizar tareas complejas y de precisión, de ahí que la coordinación entre movilidad, manipulación y lectura de datos en tiempo real sea tan importante. A esta última, la lectura y al análisis de los datos en tiempo real de una de las partes del brazo robótico nos dedicaremos en este TFG.

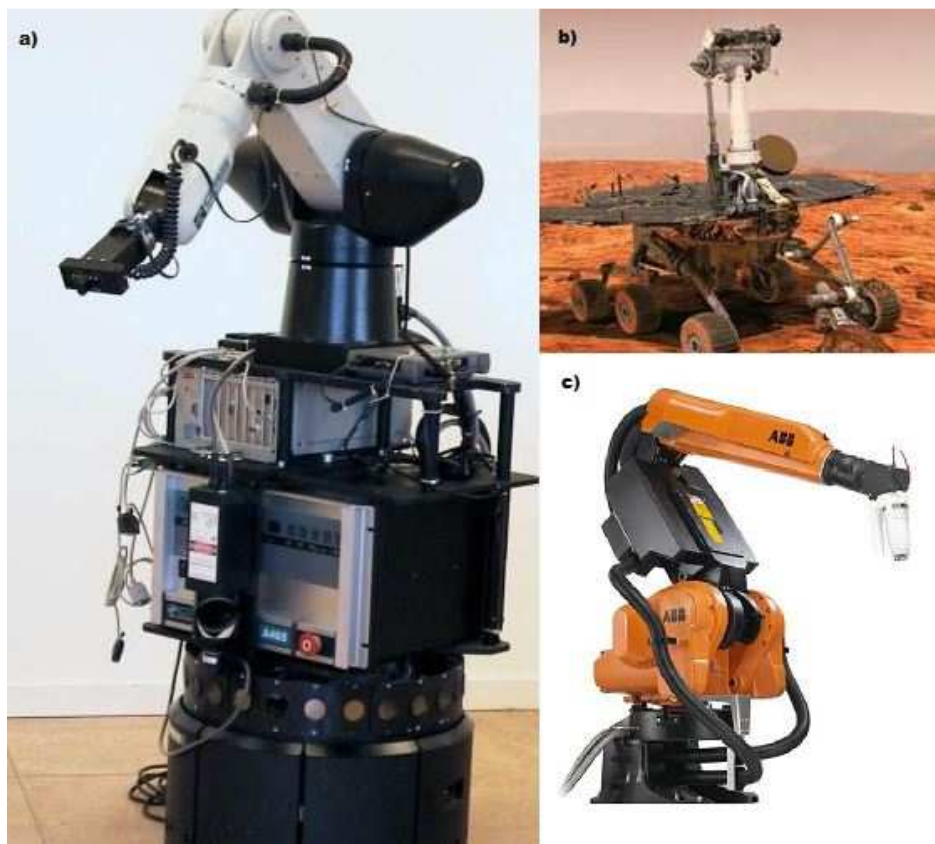


Figura 2. a) Manipulador robótico OTILIO de la UC3M. b) Robot explorador Lunar. c) Manipulador brazo robótico de ABB.

Para poder hablar de los brazos manipuladores móviles tenemos antes que incluir otro tipo de robot, los robots móviles, ya que los manipuladores móviles, como el MANFRED, se crearon a partir de la unión de estos dos tipos de robots. Tanto los robots móviles, como los brazos manipuladores (ver Figura 2.c) han seguido caminos de desarrollo distintos a lo largo de la historia, pero hace unas décadas se encontraron debido a que eran necesarios robots móviles de gran precisión para tareas en las que el entorno estaba contaminado o no era óptimo para el ser humano (catástrofes nucleares,

fondo marítimo, etc.). Estas situaciones propiciaron la aparición de los manipuladores móviles capaces de trabajar en espacios difíciles para el ser humano y con gran precisión y facilidad para superar situaciones de gran complejidad.

Los primeros manipuladores móviles eran robots teleoperados (ver Figura 3), ya que se requería la máxima fiabilidad, debido a que al principio solo actuaban en situaciones críticas (ver Figura 2.b) y además todavía no existían técnicas de control suficientemente avanzadas como para dotar al robot con un comportamiento autónomo.



Figura 3. Robot teleoperado UGV irobot packbot 510.

En la actualidad la mayoría de los manipuladores robóticos son autónomos y entre algunas de sus aplicaciones más comunes se encuentran las de asistencia a personas discapacitadas, intervención en entornos hostiles, exploración planetaria, etc.

1.1.2 Sensores de fuerza/par

Estos sensores nos permiten transformar la fuerza aplicada sobre una superficie conocida, en una magnitud eléctrica proporcional: voltaje, corriente, resistencia... Los hay de distintos tipos; Sensores Elásticos; Sensores Piezoresistivos; Sensores Capacitivos; Sensores Piezoeléctricos.



Los manipuladores robóticos móviles utilizan estos sensores para poder calcular datos como el C.M. del elemento en el que se sitúa dicho sensor, punto que nos permitirá, entre otras cosas, posicionar el manipulador, saber si se está ejerciendo una fuerza sobre el mismo, saber si el brazo robótico o el manipulador móvil han chocado con una pared o no se pueden mover y así poder corregir esta situación, y muchas otras cosas más.

En el caso de este TFG se utilizara un sensor fuerza/par JR3 para obtener los datos con los que calcular el C.M. de la pinza o elemento manipulador del extremo al que va adherido y así poder realizar la eliminación del efecto de la gravedad en las medidas tomadas por el mismo, mediante un algoritmo implementado en MATLAB [4].

1.2 MOTIVACIÓN

La motivación de este TFG es el poder extraer mediante el análisis de los datos que nos proporciona el sensor una información fiable para poder realizar la eliminación del efecto de la gravedad en las medidas del mismo. Este sensor desempeña un papel muy importante en la futura manipulación de objetos con el brazo robótico ya que nos permitirá saber en todo momento si el mismo esta sujetando algún objeto, cuánto pesa y en qué posición se encuentra, solo mediante el análisis y la adquisición de datos en tiempo real.

La adquisición de datos se basa en la obtención de 12 valores del brazo robótico. Los 6 primeros gracias al sensor JR3 y los 6 siguientes gracias a los encoders que llevan incorporados los motores.

Datos extraídos por el sensor JR3:

- 3 datos procedentes de las coordenadas de la fuerza situada en la punta del brazo robótico, es decir, la fuerza repartida en los ejes móviles x, y, y z del brazo. Estos datos nos vienen dados en kilogramos fuerza por 10 ($\text{Kg} \cdot f \cdot 10$).
- 3 datos procedentes de las coordenadas de los momentos generados en la punta del brazo robótico, es decir, el momento repartido en los ejes móviles x, y, y z del brazo. Estos datos nos vienen dados en kilogramos fuerza por centímetro ($\text{Kg} \cdot f \cdot \text{cm}$).

Datos extraídos de los encoders:

- 6 datos de posiciones que hacen referencia al giro de cada uno de los motores de los que consta el brazo.

Una vez obtenidos estos datos debemos realizar los cambios oportunos para poder trabajar con ellos y mediante MATLAB generaremos un algoritmo que nos



permita mediante el cálculo de la cinemática directa obtener la posición del robot. Una vez obtenido esto, hallaremos el centro de masas del elemento de sujeción.

Finalmente, utilizaremos el centro de masas para eliminar el efecto de la gravedad que se genera el elemento de sujeción sobre sí mismo.

1.3 OBJETIVO

El objetivo de este TFG es la eliminación del efecto de la gravedad en las medidas de un sensor de fuerza-par JR3 67M25A-U560 empíricamente utilizando pesas para la aplicación de la fuerza y posteriormente implementar un algoritmo que nos permita realizar la compensación de gravedad buscada para el brazo robótico.

Los objetivos del TFG los dividiremos en tres partes:

- En la primera realizaremos manualmente medidas de fuerza, par y posición de cada uno de los motores del brazo robótico. Estas medidas las obtendremos moviendo el brazo robótico a lo largo de todo lo que podría ser su espacio de trabajo. Con esto conseguiremos tener un gran número de medidas y así poder realizar un mejor análisis.
- En la segunda parte y una vez tratados los datos para puedan ser utilizados, procederemos a la realización de otro algoritmo. Esta vez se tratará de un programa que se encargará de realizar una compensación de gravedad, que nos permitirá encontrar el C.M. de nuestro elemento de sujeción para así poder descartar la fuerza que el brazo genera sobre sí mismo.
- En la tercera y última parte, utilizaremos el C.M. del elemento de sujeción para, mediante la colocación de pesas en el mismo y la aplicación de la teoría de la eliminación del efecto de la masa, calcular la masa que se le ha añadido al brazo robótico en su extremo y cuanto se ha desplazado el C.M. del elemento de sujeción.



1.4 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

1.4.1 CAPÍTULO 1: Introducción

En este capítulo introduciremos al lector en el TFG, con un breve resumen de los antecedentes históricos de los manipuladores robóticos móviles y de los sensores de fuerza/par. Así mismo, se expone la motivación que ha llevado a cabo la realización de este TFG, junto con los objetivos del mismo.

1.4.2 CAPÍTULO 2: Plataforma experimental

Primeramente en este capítulo presentamos el robot MANFRED y cada una de sus partes, lo que fue necesario para su construcción, las características y las especificaciones finales del mismo.

Además en el mismo capítulo introduciremos al lector en los distintos tipos de sensores de fuerza para finalmente explicar el sensor fuerza/par JR3, en especial el modelo 67M25A3-U560, que es el que está incorporado al manipulador móvil MANFRED.

Por último y para acabar el capítulo hablaremos de la tarjeta de adquisición de datos PCI bus que se encuentra conectada al sensor JR3 para poder leer y guardar los datos.

1.4.3 CAPÍTULO 3: Adquisición y tratamiento de los datos

En este capítulo primeramente explicamos que fue necesario para la adquisición de datos y como se recopilaron los mismos.

En segundo lugar analizaremos como recibimos los datos del sensor y qué clase de tratamiento deben llevar antes de poder trabajar con ellos adecuadamente a lo largo del resto del programa.

Finalmente se explica cómo se realiza la obtención de las componentes de la gravedad con respecto a los ejes del elemento de sujeción del brazo.



1.4.4 CAPÍTULO 4: Eliminación del efecto de la gravedad

En este capítulo 4 se engloba el grueso del proyecto, ya que primeramente se explica para que vamos a utilizar todos los datos que hemos leído y transformado durante las fases anteriores del TFG, el cálculo del centro de masas del elemento de sujeción del brazo.

Se harán introducciones teóricas tanto del método de identificación por mínimos cuadrados y de la teoría de la eliminación de la gravedad en las medidas obtenidas por el sensor.

1.4.5 CAPÍTULO 5: Resultados y conclusiones

En este último capítulo del TFG se mostrarán los resultados a los que se ha llegado una vez terminado el recorrido del mismo y las conclusiones que se pueden tomar al finalizar el experimento.



2 CAPÍTULO II: PLATAFORMA EXPERIMENTAL

2.1 MANFRED

En este TFG trabajamos con el manipulador móvil MANFRED creado por la UC3M. Se trata de un manipulador con 8 GDL, 6 procedentes del brazo robótico de diseño antropomórfico (ver Figura 4) y los 2 restantes de la base móvil (ver Figura 16) a la que esta acoplada el mismo. Este manipulador robótico, cuenta con un control autónomo que le hace capaz de analizar el entorno que le rodea para poder desenvolverse tal como lo haría una persona. Para que MANFRED pueda tener esta habilidad autónoma debe ser capaz de desplazarse, analizar el entorno que le rodea, coordinar su parte móvil con su brazo robótico y por último debe tener una muy buena coordinación sensorial para poder manipular objetos.

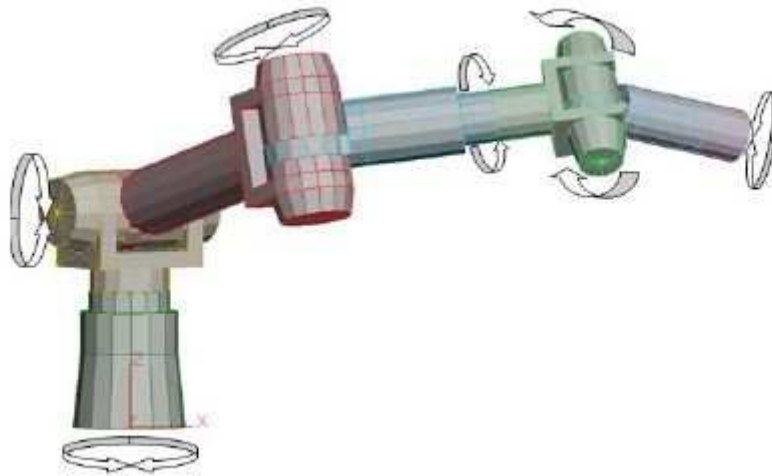


Figura 4. Grados de libertad del brazo UC3M-LWR-1. b) Base móvil de MANFRED.



Para que el manipulador robótico pueda realizar todas estas tareas es necesario que cuente con cada uno de los subsistemas [3] necesarios para que pueda llevarlas a cabo con éxito y de manera ordenada. Cada uno de estos subsistemas usa sensores para leer el entorno de trabajo que rodea al robot y generar datos que serán utilizados para darle movilidad, tanto al brazo robótico como a la base móvil. Estos subsistemas son:

- Estructura del robot.
- Sistema sensorial.
- Sistema locomotor.
- Sistema de alimentación.
- Brazo manipulador LWR-UC3M-1.
- Sistema de procesamiento.
- Sistema de control.

2.1.1 Estructura del robot

MANFRED tiene unas características básicas para un buen movimiento y coordinación (ver Figura 8.a). Estas características son las de un bajo peso y un control coordinado de todos los grados de libertad. Teniendo en cuenta estas características el manipulador móvil posee los siguientes elementos:

- Base móvil.
- Brazo manipulador ligero.
- Torso fijo.

2.1.1.1 Base móvil

La base está constituida por dos plataformas de acero de forma octogonal. Las placas de acero tienen un diámetro de 61 cm. Lleva integrada, insertada en el PC de abordo, una tarjeta controladora de 8 motores PMAC2-PCI que le permite controlar conjuntamente los grados de libertad tanto de la base móvil como los del brazo robótico. Cuenta con 5 ruedas, 3 únicamente de apoyo y las 2 restantes motrices asociadas a dos motores independientes, que es lo que permite que el robot pueda realizar giros sobre sí mismo. Además de todo esto, la base móvil sirve como soporte de anclaje al brazo, al sensor laser y a las cámaras para el sistema de visión, junto con todo su respectivo cableado (ver Figura 5).

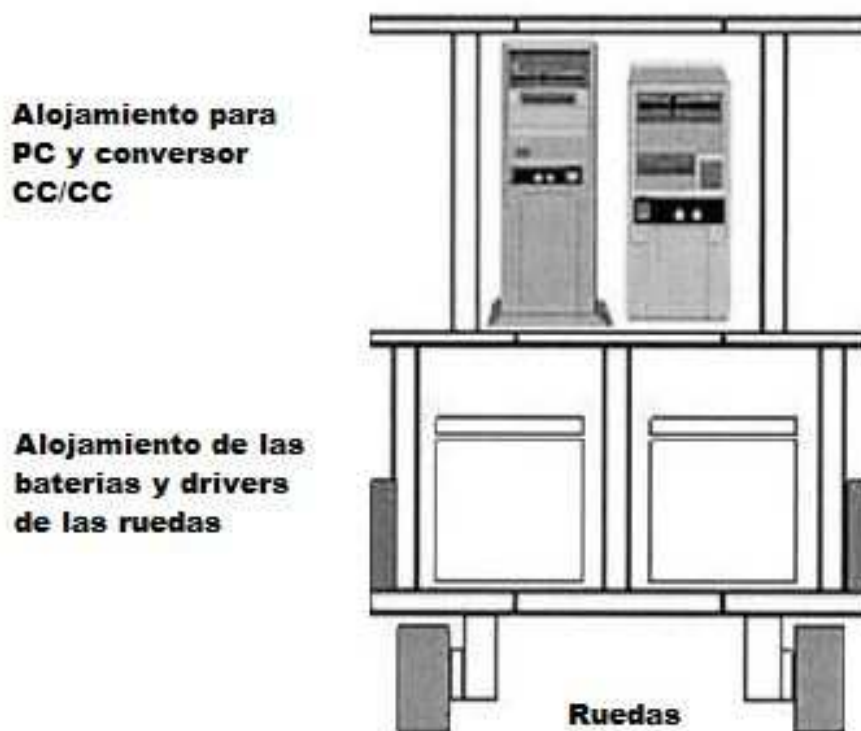


Figura 5. Esquema completo de los equipos situados en la base móvil

2.1.1.2 Brazo manipulador ligero

El brazo manipulador LWR-UC3M-1 (ver Figura 6) se trata del elemento principal del robot manipulador MANFRED.



Figura 6. Brazo manipulador LWR-UC3M-1.

Este brazo manipulador consiste en un conjunto de elementos rígidos interconectados por medio de articulaciones de revolución (ver Figura 7). Cada una de ellas le proporciona al robot un grado de libertad, haciendo esto un total de 6 GDL. El brazo está diseñado con el objetivo de obtener una gran flexibilidad para que pueda realizar tareas tales como el desplazamiento de objetos, la apertura de puertas, etc. de ahí que se asemeje al brazo de una persona.

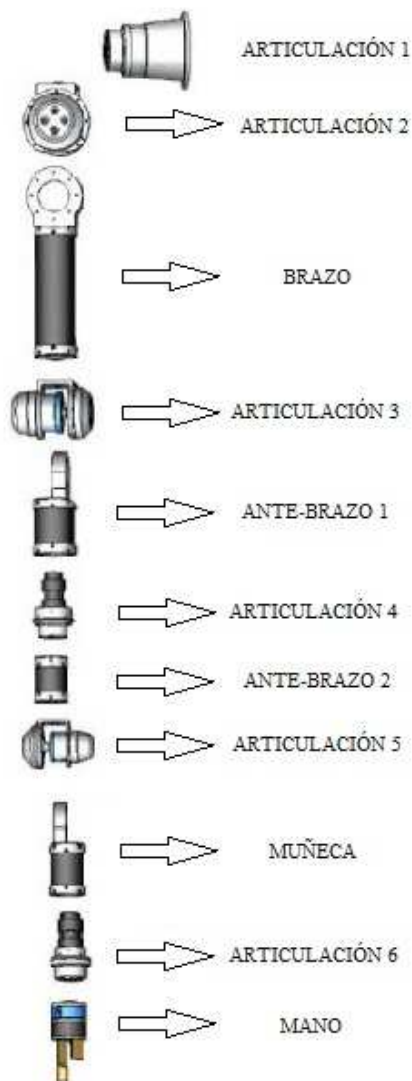


Figura 7. Estructura de las partes que forman el brazo manipulador LWR-UC3M-1.

En la Tabla 1 [3] podemos observar las características de una manera más detallada del brazo y de todos los elementos que lo componen.



Eliminación del efecto de la gravedad en las medidas
de un sensor de fuerza-par

No.	Término	Descripción
1	Grados de Libertad	6 GDL
2	Materiales	Aluminio 7075 T6, fibra de carbono y PPS.
3	Peso total del manipulador	18 Kg
4	Carga máxima	4.5 Kg
5	Velocidad máxima de la articulación	180 °/s
6	Peso de los actuadores	4.233 Kg
7	Longitud total	1205 mm (sin elemento final)
8	Alcance	955 mm (sin elemento final)
9	Control	PMAC 8 ejes (2 base + 6 brazo)
10	Motores	D.C. Brushless de modelo RBEH (Sin escobillas)
11	Reductores	Harmonic drive de categoría HFUC-2UH
12	Sensores	(1) Sensor de posición del motor + Sensor de posición de la articulación. (2) Sensor de fuerza-par en la muñeca.

Tabla 1. Características del brazo UC3M-LWR-1.



2.1.1.3 Torso fijo

Se trata de la estructura que se ha montado sobre la base móvil del robot y que hace de cuerpo del mismo, alojando todo el cableado del brazo manipulador con el robot. En el torso también van situados la plataforma de visión y la telemetría laser 3D (ver Figura 8).

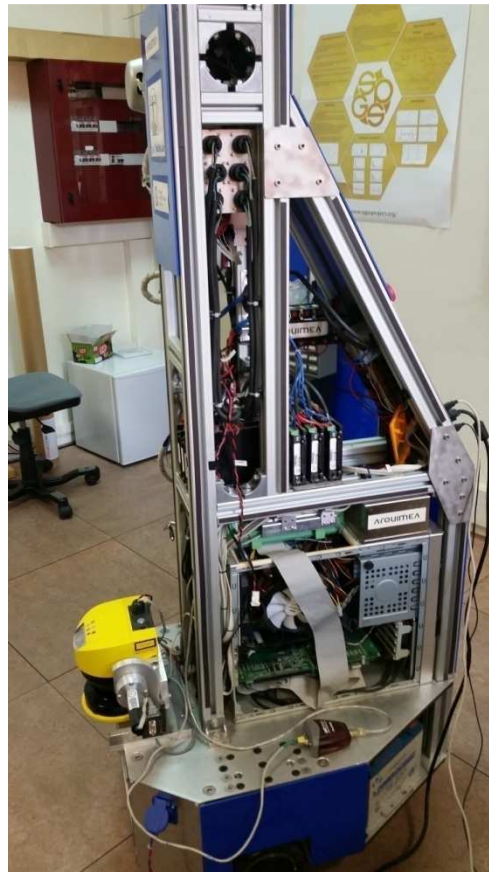


Figura 8. Vista lateral de MAFRED, base móvil y el torso fijo.

2.1.2 Sistema sensorial

Nos permite obtener información del entorno de trabajo, la cual utilizaremos para poder dar al robot la capacidad de movimiento. Este sistema está formado por otros subsistemas (ver Figura 9), los cuales permitirán al robot, de una manera ordenada, obtener datos de localización, planificación de movimiento, etc. De esta manera MANFRED podrá desenvolverse en los entornos para los que está diseñado, entornos para personas.

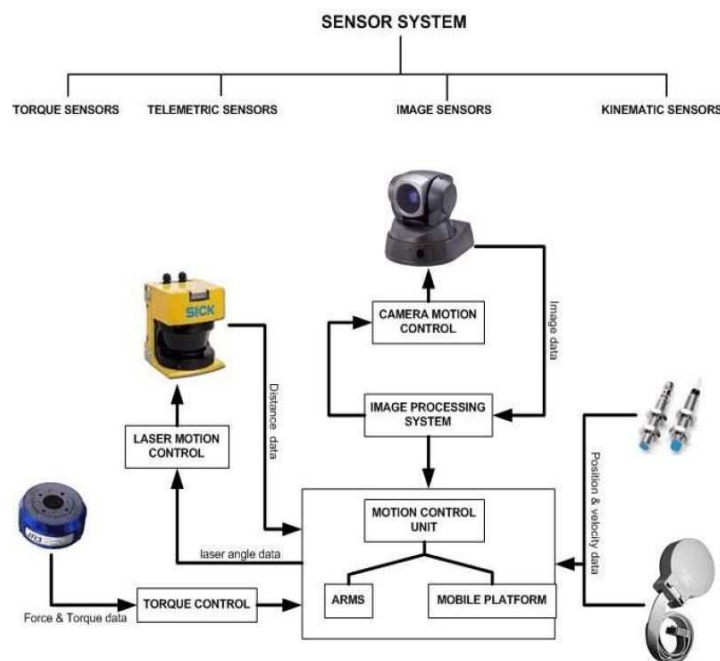


Figura 9. Sistema sensorial de MANFRED.

MANFRED cuenta con los siguientes subsistemas:

- Telemetría laser.
- Visión.
- Sensor fuerza/par.
- Sensores cinemáticos o de posición.

2.1.2.1 Telemetría láser

Su objetivo es la lectura de datos referente a la distancia de objetos con los que se puede encontrar o interactuar el robot durante su desplazamiento. Genera un modelado del espacio de trabajo que rodea al manipulador móvil. Este subsistema está formado por un telémetro láser Hokuyo UTM-30LX (ver Figura 10) cuyas características se muestran en la Tabla 2 y un telémetro láser bidimensional PLS de Sick (ver Figura 11.a) cuyas características se muestran en la Tabla 3. Este último posee un chasis motorizado que le permite realizar un movimiento vertical dentro de un rango de 45 grados (ver Figura 11.b), gracias a esto el telémetro láser bidimensional PLS de Sick puede modelar espacios de trabajo en 3D o 2D.



Figura 10. Telémetro láser Hokuyo UTM-30LX

RANGO DE APERTURA MÁXIMO	270°
RANGO DE DISTANCIA DE DETECCIÓN	100 mm – 30.000 mm
PERÍODO DE ESCaneo MÍNIMO	25 ms
RESOLUCION ANGULAR	0.25°
ALIMENTACIÓN	12 V a 700mA

Tabla 2. Características del Telémetro láser Hokuyo UTM-30LX

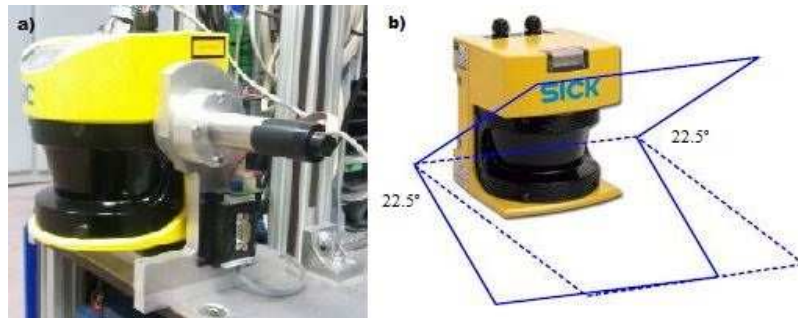


Figura 11. a) Telémetro láser bidimensional PLS de Sick. b) Rango de análisis de 45 grados gracias al soporte de sujeción.

RANGO MÁXIMO DE DETECCIÓN	80 m
RESOLUCION ANGULAR	0.25° /0.5° /1° (seleccionable)
TIEMPO DE RESPUESTA	26ms
RESOLUCIÓN DE LA MEDIDA	10 mm
TASA DE TRANSFERENCIA	500 kbaud
ALIMENTACIÓN	24 V a 6 A

Tabla 3. Características del Telémetro láser bidimensional PLS de Sick.

2.1.2.2 Visión

Una vez generado el espacio de trabajo 3D este subsistema se encarga de que el robot pueda manipular objetos situados en este espacio de trabajo. Para poder llevar la manipulación el robot cuenta con cámaras de color (ver Figura 12.a) y una cámara 3D (ver Figura 12.b).



Figura 12. a) Cámaras de color de MANFRED. b) Cámara 3D de MANFRED.

2.1.2.3 Sensor fuerza/par

Es un sensor que nos sirve para la interacción con el entorno del robot, midiendo la fuerza y el par generados por cualquier objeto que se situé en el extremo de sujeción del mismo. El sensor va conectado a un sistema de adquisición de datos que funciona bajo los soportes de Linux o Windows.

Dentro del mercado de sensores fuerza/par tenemos los sensores elásticos, los Piezoresistivos, los capacitivos, los piezoeléctricos y los sensores basados en célula de carga (ver Figura 13). Estos últimos son los que vamos a estudiar con mayor detenimiento a lo largo de este TFG debido a que el sensor que queremos calibrar pertenece a esta clase.



Figura 13. Sensor fuerza/par JR3.

2.1.2.4 Sensores cinemáticos o de posición

Hay distintos tipos de sensores Cinemáticos o de posición como pueden ser: potenciómetros angulares, láser, inductosyn, sincros y resolvers, ultrasónicos, magnetostrictivos y encoders. Estos últimos son los sensores que han sido utilizados en el MANFRED y que van acoplados a cada uno de los motores del robot proporcionándonos datos sobre la posición del mismo. Esto, lo hacen analizando el giro de los mismos en forma de cuentas de encoder, de esta forma, podemos saber la aceleración, la velocidad y las posiciones relativas de cada uno de los sistemas acoplados a dichos motores. Con el objeto de completar los sensores cinemáticos se incorporan unos sensores de detección de *home* que permiten en una rutina de arranque inicial establecer las posiciones absolutas de cada sistema motriz.

En este TFG los sensores cinemáticos o de posición que se utilizan en cada articulación del brazo son los incluidos por los propios motores sin escobillas de corriente continua “Brushless”. Se tratan de encoders ópticos de alta resolución HEDS-550 con una resolución de 1024 cent/Rev. y una alimentación de 5 V y una frecuencia de conteo de 100 KHz (ver Figura 14).



Figura 14. Encoder HED-550.

2.1.3 Sistema locomotor

Este sistema está compuesto por la ya antes mencionada base móvil con sus 5 ruedas (ver Figura 15), 3 de ellas que mejoran el apoyo del robot y facilitan su movimiento y otras 2 asociadas a los motores. Las ruedas asociadas a los motores con las que mediante un desplazamiento diferencial hacen que el robot gire o vaya recto.

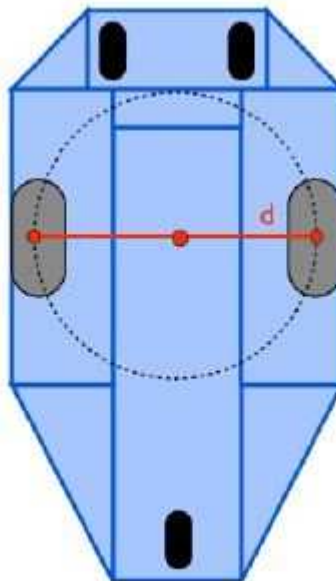


Figura 15. Esquema del posicionamiento de las ruedas en la base móvil.

2.1.4 Sistema de alimentación

Para suministrar tensión a todo el robot, éste posee 4 baterías que sirven como fuente de alimentación y dotan de autonomía al robot. Las 4 baterías son de 12 V cada una y están conectadas en series suministrando una tensión continua de 48 V. las baterías seleccionadas son el modelo PS-12450 B de PowerSonic (ver Figura 16) [5]. Además de esto y como sistema de seguridad, lleva instalado un sistema de monitorización de baterías a través de un micro-controlador PIC16F818 que mide en todo momento la tensión suministrada por la batería. Este sistema permite realizar una parada automática si la tensión de alimentación disminuye o si la corriente umbral aumenta.



Figura 16. Sistema de alimentación MANFRED con baterías PS-12450 B.



2.1.5 Sistema manipulador UC3M-LWR-1

Para que el manipulador móvil MANFRED (ver Figura 17) pudiera realizar tareas de manipulación se le equipó con el brazo robótico UC3M-LWR-1 con 6 GDL. Este brazo manipulador ha sido diseñado íntegramente por la UC3M y sus principales características [2] son:

- Redundancia cinemática similar al brazo humano.
- La masa del conjunto cuando se construyó era de 18 kilogramos. Lo que lo convertía en un brazo bastante ligero. Ahora ha aumentado un poco debido al cambio de alguno de sus componentes.
- Capacidad de carga máxima de 4.5 kilogramos en el extremo del brazo.
- Relación carga/peso entre 1:3 y 1:4.
- Alcance en torno a 955 milímetros.

Para que el sistema de visión y telemetría láser 3D puedan percibir sin ningún problema todo el entorno que lo rodea el brazo ha sido instalado en uno de los laterales del torso fijo. El brazo está compuesto por componentes electromecánicos de altas prestaciones que permiten a su vez disminuir el peso del conjunto. Para lograr que el conjunto global del brazo junto con sus sistemas de control y potencia no superara los 30 kg se utilizaron diferentes elementos constructivos que reducirían el peso del mismo:

- Motores sin escobillas de corriente continua “Brushless”. Estos motores permiten alimentar directamente en continua a los accionadores.
- Equipos de reducción de velocidad y aumento de par de tipo Harmonic Drive.
- La estructura se realizó en aleación de aluminio 7075 T6 para las uniones y fibra de carbono para los eslabones de los brazos.



Figura 17. Brazo manipulador UC3M-LWR-1 con 6 GDL.

2.1.6 Sistema de procesamiento

El sistema de procesamiento de un manipulador móvil debe ser capaz de procesar gran cantidad de información sensorial y cerrar varios lazos de control simultáneamente. Para ello se ha generado un software que cumple los siguientes objetivos:

- Fiabilidad en la percepción.
- Fiabilidad en el control.
- Comportamiento tolerante a fallos.
- Localización de fallos y aislamiento de los mismos.
- Autonomía de decisión y manejo de situaciones excepcionales.

Todo estos objetivos se desarrollan mediante una arquitectura software modular, de manera que se hace mucho más fácil el intercambio de datos entre cada uno de los módulos, mejorando así, el desarrollo, la comprobación y la actualización de los distintos algoritmos. Cada uno de los módulos funcionales ha sido dotado de auto-diagnostico, lo que nos facilita una rápida detección de fallos en cada uno de ellos.

En cuanto al control de esta arquitectura diseñada se realiza mediante el PC asignado al control coordinado de cada una de las funciones básicas del control del sistema. Esto se lleva a cabo mediante una tarjeta controladora de 8 ejes que explicaremos brevemente en el apartado de sistema de control.

2.1.7 Sistema de Control

Para que MANFRED pueda funcionar correctamente y mantener una buena coordinación entre la base móvil y el brazo robótico es necesario de un elemento de control que se encargue de ésto. El elemento que MANFRED tiene destinado al control de cada uno de sus 8 motores se trata de la tarjeta controladora PMAC2PCI [3] (Programmable Multi-Axis Controller) (ver Figura 18).

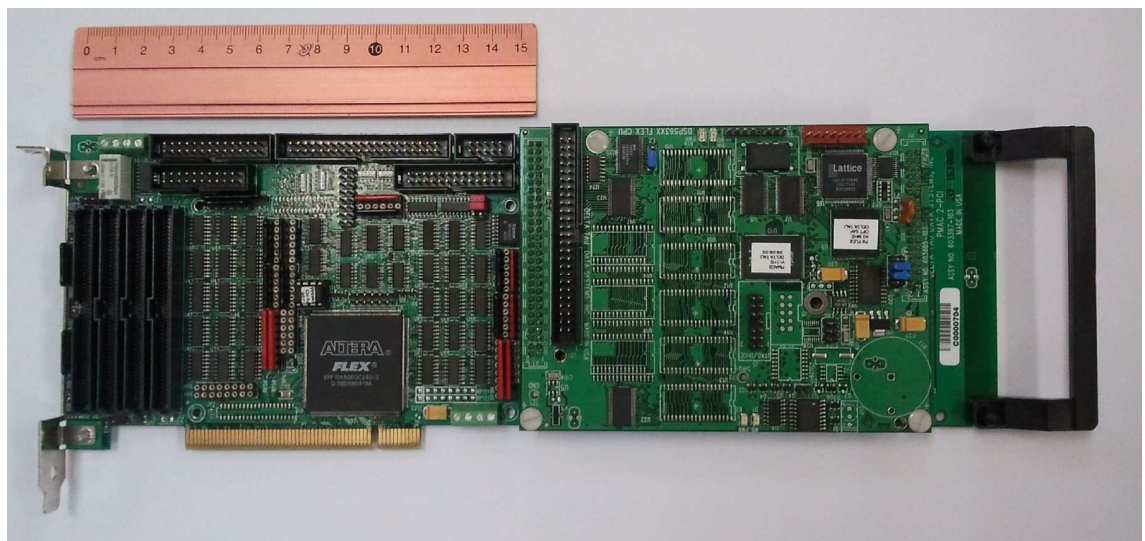


Figura 18. Tarjeta controladora PMAC2-PCI.

Esta tarjeta, de la compañía Delta Tau Data Systems, Inc., se trata de un dispositivo que puede encargarse de controlar a la vez hasta un número de 8 motores. El modelo que lleva instalado el MANFRED es la versión DSP56002 de 24 bits y frecuencia de trabajo de 40 MHz.

2.2 SENSORES DE FUERZA

Estos sensores nos permiten transformar la fuerza aplicada sobre una superficie conocida, en una magnitud eléctrica proporcional: Voltaje, corriente, resistencia, etc. Los manipuladores robóticos móviles utilizan estos sensores para poder calcular datos como el C.M., punto que nos permitirá, entre otras cosas, situar la posición del manipulador y de saber la fuerza que está siendo ejercida sobre el mismo.

Los sensores de fuerza pueden ser de 4 tipos [6] [7]:

- Sensores elásticos
- Sensores piezorresistivos
- Sensores capacitivos.
- Sensores piezoeléctricos

2.2.1 Sensores elásticos

Consisten de un material elástico como espuma o esponja de tipo conductiva, ubicada entre dos placas aislantes protectoras que tienen una doble funcionalidad, por un lado protegen la espuma y por otro sirve de soporte de los contactos eléctricos en forma de puntos que sobresalen de las placas (ver Figura 19).

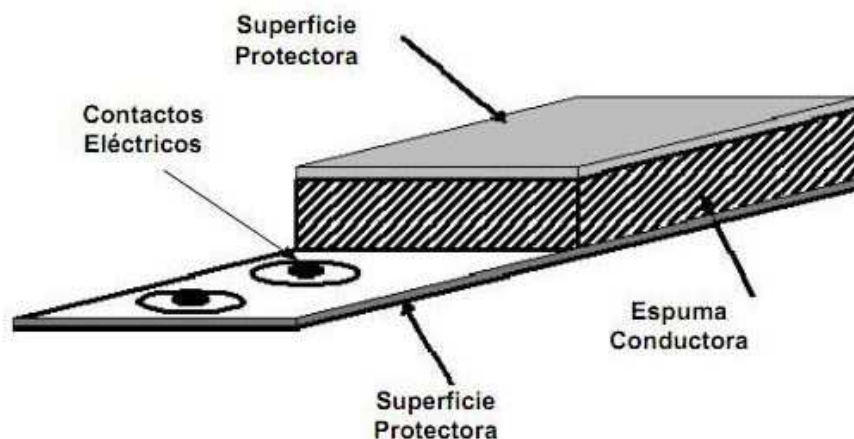


Figura 19. Partes de un sensor elástico.

Cuando una fuerza actúa sobre la superficie protectora, la espuma conductora se deforma, cambiando su densidad en la región deformada, lo cual a su vez varía la resistencia medida entre las dos superficies protectoras. Es un método relativamente



fácil de implementar, ya que solo se necesita medir la variación de corriente a través de la espuma.

2.2.2 Sensores piezorresistivos

Son considerados la evolución de los sensores elásticos y se basan en el principio de la piezoresistividad, fenómeno consistente en la variación de la resistencia de un material al aplicarle una presión sobre sus superficies. La diferencia que tiene con los elásticos es que en lugar de colocar una espuma conductora, se coloca un plástico conductor no deformable, lo que hace que este sensor tenga una vida útil mucho más prolongada que los elásticos. Además el material piezorresistente posee una deformación más lineal que la que presentan los sensores elásticos.

2.2.3 Sensores capacitivos

Los sensores capacitivos operan según la expresión matemática:

$$C = \varepsilon * \frac{A}{d} \quad (1)$$

dónde ε es la permitividad del medio dieléctrico que separa las placas, A es la superficie de las placas y d es la distancia entre las placas del condensador. Podemos obtener variaciones de la capacidad del sensor modificando cualquiera de los parámetros de la expresión anterior.

Como se observa en la figura 20, a medida que el eslabón en forma de “T” se hunde, el área del condensador aumenta lo que supone un aumento lineal en la capacidad del condensador.

La ventaja que se tiene con los sensores de tipo resistivo es que tienen una respuesta mucho más lineal. Sin embargo, el inconveniente de este tipo de sensores es que necesitan un circuito adicional para la conversión de capacitancia a corriente. Todo lo que sea añadirle más circuitos al sensor conllevará un costo mayor que habrá que tener en cuenta.

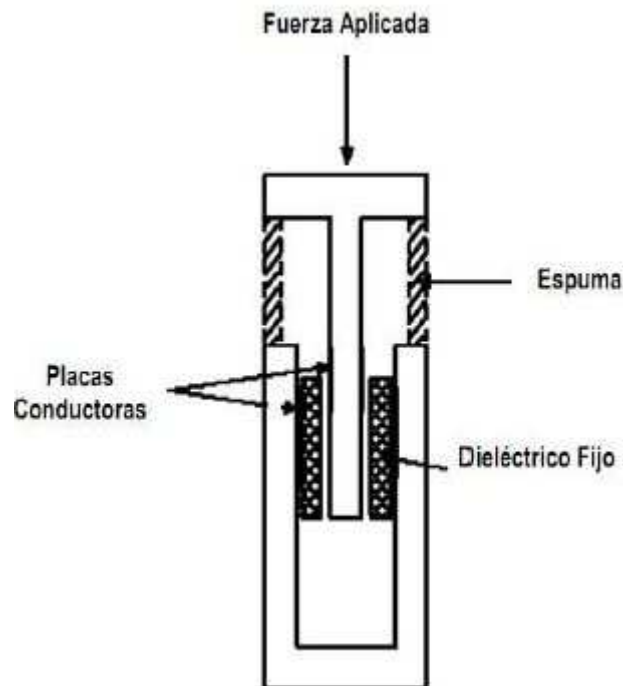


Figura 20. Sensor capacitivo

2.2.4 Sensores piezoeléctricos

Este es otro de los sensores de fuerza más comunes. Se trata de un conjunto de placas protectoras que contienen un material sensor, el material puede ser algún tipo de cristal de cuarzo o cerámica tratada con propiedades piezoeléctricas. Internamente está constituido de moléculas bipolares ordenadas que actúan como pequeños dipolos eléctricos, que al aplicarles una cierta fuerza producen una pequeña oscilación hasta que se estabilizan, es esta oscilación de cargas lo que genera un voltaje en forma de senoide amortiguada, que posteriormente es procesada por circuitos adicionales.

2.2.5 Sensores de la marca JR3 inc.

Los sensores JR3 [8] son del tipo del sensor que hemos utilizado en este TFG, se basan en una célula de carga triaxial y se fabrican en aluminio, en acero inoxidable o en titanio. En la mayoría de los modelos los datos analógicos se convierten a formato digital mediante sistemas electrónicos incluidos en el sensor. Opcionalmente algunos modelos proporcionan la salida analógica en lugar de la digital.



De la fabricación de estos sensores se encarga *JR3 inc.* Este fabricante establece que los ejes XY del sensor deben de situarse en el plano horizontal medio del cuerpo del sensor, mientras que su eje “z” estará situado como su eje central. El origen de este sistema de coordenadas es el punto de referencia que el sensor toma para todas las mediciones.

El fabricante *JR3 inc.* nos proporciona dos líneas de modelos [9] donde escoger :

- La familia “M”.
- La familia “E”.

2.2.5.1 Serie M

El número anterior a la letra M define el diámetro nominal en mm, y el posterior el espesor nominal del sensor igualmente en mm. En nuestro caso que usamos el sensor 67M25A3-U560, tiene un diámetro nominal de 67 mm y un espesor nominal de 25 mm.

Los sensores M incluyen una electrónica interna para una mayor inmunidad al ruido, una opción de salida digital para usar con una tarjeta de datos PCI de *JR3 inc.*, que mas tarde explicaremos, una opción de salida analógica y una configuración electrónica de medio puente. Sus especificaciones típicas son:

- Precisión nominal: 1% del FS.
- Linealidad: 0,5% FS dentro del rango y 0,1% por debajo de ¼ de FS.
- Resolución: 1/4000 FS.
- Repetibilidad mejor que precisión absoluta.

2.2.5.2 Serie E

Se tratan de la gama de sensores más exigentes para aplicaciones en las que la precisión deba de ser muy elevada.

El número anterior a la letra “E” indica el diámetro nominal en pulgadas y el numero posterior el espesor en pulgadas. Su principal característica que los diferencia de los sensores serie M es que los E poseen un puente completo en su configuración electrónica, mientras que los M tienen medio puente. Esta diferencia es la que les proporciona una alta precisión.

Los sensores E incluyen, al igual que los M, una electrónica interna para una mayor inmunidad al ruido, una opción de salida digital para usar con una tarjeta de datos PCI de *JR3 inc.* y una opción de salida analógica. Las especificaciones típicas son:

- Precisión nominal: 0.25% del FS.
- Linealidad: 0,5% FS dentro del rango y 0,1% por debajo de $\frac{1}{4}$ de FS.
- Resolución: 1/8000 FS.
- Repetibilidad mejor que precisión absoluta.

Como se puede apreciar la única diferencia, y la que hace que sus precios varíen en mayor o menor medida, es la precisión de la medición, siendo mucho más precisos los “E” que los “M”. Los precios de la serie E varían desde los 5.285 \$ hasta los 5.915 \$, mientras que la serie M van desde los 4.485 \$ hasta los 4.755 \$. El robot MANFRED posee un serie M ya que su precisión y características son suficientes.

Nuestro modelo del JR3 serie M [10] tiene como rango máximo del valor de la fuerza en x, según el fabricante, ± 400 N. Está situado entre el extremo del brazo y la pinza o elemento terminal (ver Figura 21) y nos proporciona medidas de fuerza y par en 6 ejes que se utilizan en el lazo de control de fuerza del manipulador móvil.

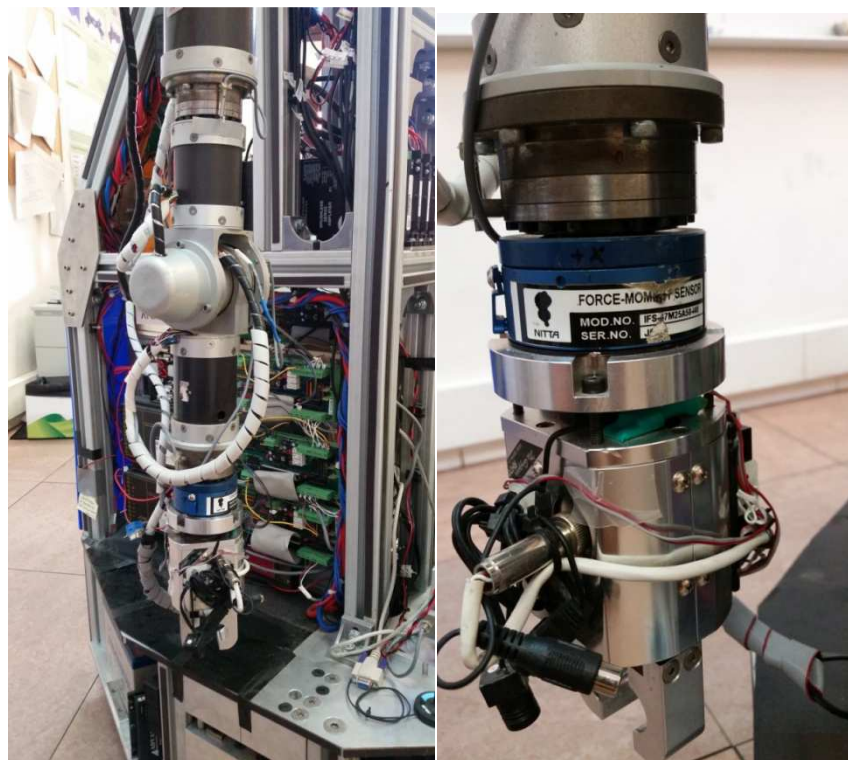


Figura 21. Situación del sensor JR3 en el brazo manipulador.



Tiene una capacidad de carga de hasta 11 Kilogramos y una frecuencia de funcionamiento en torno a 8 KHz. Además su peso es de aproximadamente 175 gramos.

El sensor se ha conectado a un receptor basado en DSP, con formato de tarjeta para bus PCI, de esta forma la corriente de medidas de fuerza y par accesibles por el software de control tiene un gran ancho de banda.

Para que el sensor JR3 pueda obtener y guardar los distintos tipos de datos extraídos de las pruebas necesita una tarjeta de adquisición de datos. Esta se encargará como su nombre indica de extraer los datos del sensor y además mediante drivers desarrollados en lenguaje c++ será capaz de ordenarlos, para que el usuario pueda visualizarlos y trabajar con ellos.

2.2.5.3 Tarjeta de adquisición de datos

La tarjeta de adquisición de datos que se usa en este TFG se trata de una PCI BUS PN 1583(ver Figura 22.a.b.c.) [11]. Dicha tarjeta posee 1 puerto de tecnología analógica ADSP-2184(ver Figura 22.d) de alta velocidad y se conecta con el sensor de fuerza/par mediante un cable modular de 6 u 8 pines. La PCI-bus utiliza este cable para recibir a alta velocidad los datos proporcionados por el sensor, así como para suministrar la energía que requiere este sensor para su funcionamiento. La tarjeta consta de un circuito para controlar y ajustar la tensión de alimentación del sensor JR3 al que esté conectada. En cuanto a su propia alimentación, la PCI no requiere de fuente externa, ya que la energía que necesita la recibe directamente del ordenador en el que se encuentra instalada. Sus tensiones y corrientes de funcionamiento:

- 5V - 870 mA típico
- 12 V - 25 mA típico (w / o sensor)
- -12V - 5 mA típico (w / o sensor)



Figura 22. a).b).c) Tarjeta de adquisición de datos PCI BUS PN 1583 .d) Tarjeta de adquisición de datos PCI BUS PN 1583 con el puerto ADSP-2184 en detalle.

El acceso a los datos recibidos por la PCI se hace directamente en la memoria de la tarjeta, en la cual cada dato tiene su propia dirección predeterminada.

La tarjeta de adquisición de datos PCI-BUS PN 1583 de *JR3 inc.* va instalada en un PC con sistema operativo Linux.



3 CAPÍTULO III: ADQUISICIÓN Y TRATAMIENTO DE DATOS



En este capítulo explicaremos como se desarrollo el TFG, los problemas que encontramos y como los resolvimos.

Para que un manipulador robótico, en este caso, MANFRED, pueda realizar acciones de manipulación, como pueden ser, coger un libro o abrir una puerta, este tiene que ser capaz de controlar la fuerza y de ajustarse de la mejor manera posible a ella para poder manipular el objeto que desee.

El manipulador MANFRED cuenta para ello con el sensor fuerza/par JR.67M25A-U560 [9]. Este sensor nos servirá para, aplicada una fuerza sobre el elemento de sujeción del robot, sacar su magnitud, su dirección y sentido, para así poder controlarla de una manera eficiente.

Para poder realizar la eliminación del efecto de la gravedad en las medidas, como se desea en este TFG debemos seguir unos pasos previos:

- Realizar una adquisición de los datos de la fuerza y el par en el espacio de trabajo medidos tanto por el sensor como por los encoders de cada una de las articulaciones. Una vez realizada esta tarea debemos aplicar a los datos una serie de transformaciones para que se pueda trabajar con ellos.
- Calcular el vector de gravedad, en ejes del elemento de sujeción, para cada una de las posiciones anteriormente leídas del brazo robótico. Esto nos servirá para saber en qué posición se encontraba el elemento de sujeción con respecto al brazo y así más tarde poder eliminar el efecto de la masa de ese elemento sobre el sensor.
- Por último para que la eliminación del efecto de la gravedad pueda llevarse a cabo necesitamos saber el C.M. del elemento de sujeción, ya que va a ser aquí donde se aplicara el anteriormente calculado vector de gravedad. Esta parte del TFG se desarrollará, debido a su extensión, en un capítulo aparte (CAPÍTULO 4).

3.1 Adquisición de datos

Los datos los obtenemos moviendo el robot manualmente hacia distintos puntos y tomando medidas en cada uno de ellos gracias a la tarjeta de adquisición de datos y a los drivers en C++, ya generados en otros proyectos y gracias a los encoders situados en cada uno de los motores de las articulaciones.

Los movimientos del brazo robótico se hacen manualmente, moviendo progresivamente cada una de las articulaciones del mismo de manera que en cada movimiento hubiera como mucho de una a dos articulaciones cambiadas con respecto a la posición anterior. El brazo se situaba siempre en su espacio típico de trabajo y no en posiciones extrañas en las que el robot no fuera a posicionarse nunca. Recordamos que



se trata de un brazo antropomórfico y como tal, sus movimientos serán parecidos en su mayor medida a los desarrollados por un brazo humano.

3.1.1 Clasificación de datos

Una vez extraídos los datos del sensor JR3, mediante la tarjeta de adquisición, los drivers desarrollados en C++ y la posición de los encoders situados en las articulaciones, se obtienen 12 dígitos (ver Figura 23) que corresponden a los datos que debemos clasificar y tratar de la manera adecuada para realizar una buena calibración del sensor.

```
0.250000 -0.750000 12.000000 0.125000 -0.125000 -0.125000 0.310365 -0.204140 0.402650 0.091406 0.031174 0.000000
0.250000 -0.750000 11.875000 0.125000 -0.125000 -0.125000 0.310365 -0.204140 0.402650 0.091406 0.031174 0.000000
0.250000 -0.750000 11.875000 0.125000 -0.125000 -0.125000 0.310365 -0.204140 0.402650 0.091406 0.031174 0.000000
0.250000 -0.750000 11.875000 0.125000 -0.125000 0.000000 0.310365 -0.204140 0.402650 0.091406 0.031174 0.000000
0.250000 -0.750000 11.875000 0.250000 -0.125000 -0.125000 0.310365 -0.204140 0.402650 0.091406 0.031174 0.000000
0.250000 -0.750000 11.875000 0.125000 -0.125000 -0.125000 0.310365 -0.204140 0.402650 0.091406 0.031174 0.000000
-0.750000 -0.625000 12.000000 0.250000 0.625000 -0.125000 0.310365 -0.204140 0.402650 0.091406 0.065918 0.000000
-0.500000 -0.875000 11.875000 0.125000 0.625000 -0.125000 0.310365 -0.204140 0.402907 0.091406 0.566342 0.000000
-0.750000 -0.875000 11.875000 0.000000 0.750000 -0.125000 0.310365 -0.204140 0.401311 0.091406 1.303476 0.000000
0.375000 -1.000000 12.000000 0.125000 -0.250000 -0.125000 0.310365 -0.204140 0.402101 0.091406 2.199315 0.000000
0.125000 -0.875000 11.625000 0.125000 -0.125000 -0.125000 0.310365 -0.204140 0.402101 0.091406 3.367659 0.000000
-0.375000 -0.750000 11.875000 0.250000 0.250000 -0.125000 0.310365 -0.204140 0.400727 0.091406 4.732246 0.000000
-1.125000 -0.500000 11.625000 0.250000 0.750000 -0.125000 0.310365 -0.204140 0.401809 0.091406 6.217407 0.000000
-1.000000 -0.875000 12.000000 0.125000 0.625000 -0.125000 0.310365 -0.204140 0.401002 0.091406 7.656884 0.000000
-2.375000 -0.625000 12.125000 0.125000 1.500000 -0.125000 0.310365 -0.204140 0.399131 0.091406 9.126298 0.000000
```

Figura 23. Ejemplo de obtención de los datos desde la tarjeta de adquisición sin transformar.

La clasificación de estos se lleva a cabo mediante los algoritmos desarrollados en C++ y es la siguiente:

- Los 3 primeros valores obtenidos (ver Figura 24) por sensor se trata de las coordenadas de la fuerza que se está aplicando a la pinza junto con el peso de la misma que detecta el sensor, F_x , F_y y F_z .

```
0.250000 -0.750000 11.875000 0.125000 -0.125000 0.000000 0.310365 -0.204140 0.402650 0.091406 0.031174 0.000000
```

Figura 24. F_x , F_y y F_z que nos proporciona la tarjeta de adquisición



Eliminación del efecto de la gravedad en las medidas de un sensor de fuerza-par

- Los 3 siguientes valores obtenidos (ver Figura 25) se trata de los momentos que se generan en el sensor debido al peso del elemento de sujeción, M_x , M_y y M_z .

0.250000 -0.750000 11.875000 0.125000 -0.125000 0.000000 0.310365 -0.204140 0.402650 0.091406 0.031174 0.000000

Figura 25. M_x , M_y y M_z que nos proporciona la tarjeta de adquisición

- Las 6 últimos (ver Figura 26) se trata de las posiciones angulares de las articulaciones del robot. Cada uno de esos valores corresponde a la rotación de cada uno de los motores con respecto de la posición inicial del brazo. El brazo posee 6 motores y se corresponden a los datos extraídos por el sensor tal y como se muestra en la Tabla 7.

0.250000 -0.750000 11.875000 0.125000 -0.125000 0.000000 0.310365 -0.204140 0.402650 0.091406 0.031174 0.000000

Figura 26. Rotación angular de cada uno de los motores que nos proporciona la tarjeta de adquisición

3.1.2 Ajuste de los datos

Cada uno de estos datos obtenidos por el sensor y ya clasificados en sus correspondientes tipos (Fuerzas, Momentos o ángulos de rotación) posee unas unidades que no se corresponden a las del sistema internacional, por lo tanto deben de ser modificadas para que no haya ningún fallo de concordancia durante el desarrollo del TFG.

Los datos correspondientes a la fuerza vienen dados en kilogramos fuerza por 10. Las unidades que queremos que tengan en este caso son las de kilogramo fuerza.

Los datos correspondientes a los momentos vienen dados en kilogramo fuerza por centímetro. Las unidades correspondientes pasadas al sistema internacional serian las de kilogramos fuerza por metros.

Los datos correspondientes a la rotación angular de cada uno de los motores articulares se encuentra en grados. Las unidades correspondientes pasadas al sistema internacional serian las de radianes.

3.1.3 Ajuste de los ejes

Una vez leídos los datos nos surge un problema de correlación, ya que los ejes que la toolbox de robótica de nuestro algoritmo en MATLAB no corresponden a los que la tarjeta de adquisición de datos nos proporciona (ver Figura 27). Esto es debido a que los ejes móviles del elemento de sujeción no están colocados de la manera habitual, por lo que nos vemos obligados a hacer una transformación para que ambos ejes coincidan y no haya problemas de correlación.

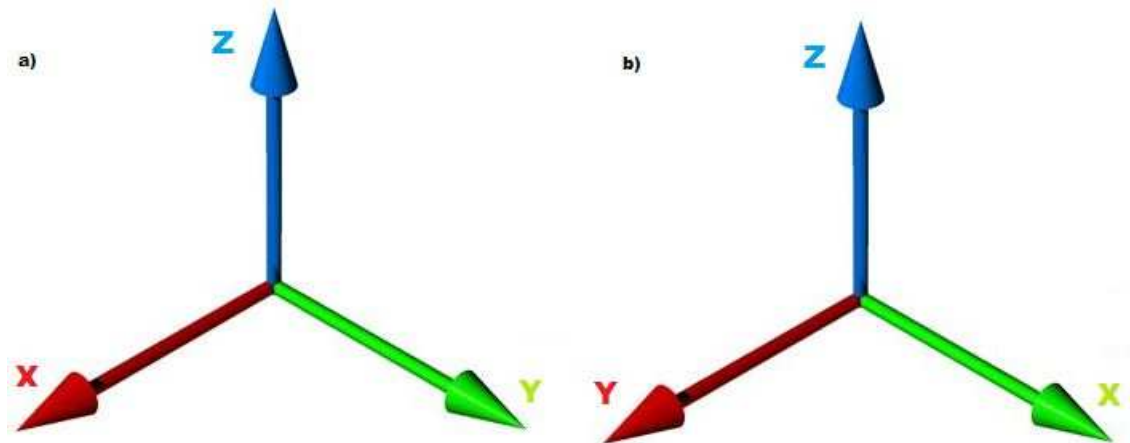


Figura 27. a) Ejes pertenecientes al algoritmo de MATLAB. b) Ejes pertenecientes a los datos obtenidos con la tarjeta de adquisición.

Para resolver esto lo que debemos de hacer es las componentes x, tanto de las fuerzas como de los momentos. Esta modificación solo supondrá la negación de las mismas para que haya una buena correlación entre los dos ejes de la Figura 28.

Una vez hechos los cambios, tanto de unidades como de correlación entre ejes, los datos ya están preparados para ser usados en el algoritmo de MATLAB que hemos diseñado para poder eliminar el efecto de la gravedad en las medidas y así poder obtener lo que buscamos en este TFG.

3.1.4 Cálculo del vector gravedad en ejes del brazo

Una vez realizada la transformación de todos los datos, que fueron extraídos del brazo robótico por los drivers, a datos preparados para poder trabajar con ellos, pasaremos a crear a partir de los siguientes un vector para cada uno de los packs de 12 datos extraídos. Este vector estará formado por las componentes de la gravedad que estarían actuando en ese instante sobre el sensor debido a la masa del elemento de sujeción. Esto es así para a través de este vector poder, situando la fuerza en el C.M. del

elemento de sujeción, descontar el efecto de la gravedad que crea la masa del elemento de sujeción sobre el sensor.

De una manera más específica el algoritmo generado en MATLAB se encargará de crear una matriz de vectores de componente de la gravedad con respecto a los ejes móviles del elemento de sujeción. Esto lo hacemos mediante el método de la cinemática directa, que nos permite deducir estas componentes a partir de los datos de la posición y orientación del brazo robótico. Este algoritmo nos servirá a la hora de realizar la eliminación de la gravedad de las medidas ya que para generar la matriz $D(g)$ (ecuación 9) necesitaremos las componentes de la fuerza de gravedad con respecto al elemento de sujeción para cada uno de los conjuntos de datos leídos.

Para ilustrar este proceso de una manera más gráfica analizaremos como se hace con el primer conjunto de 12 datos:

- Separamos los 6 datos (Figura 26) referentes a la posición y orientación del brazo robótico que vamos a estudiar (Figura 28).

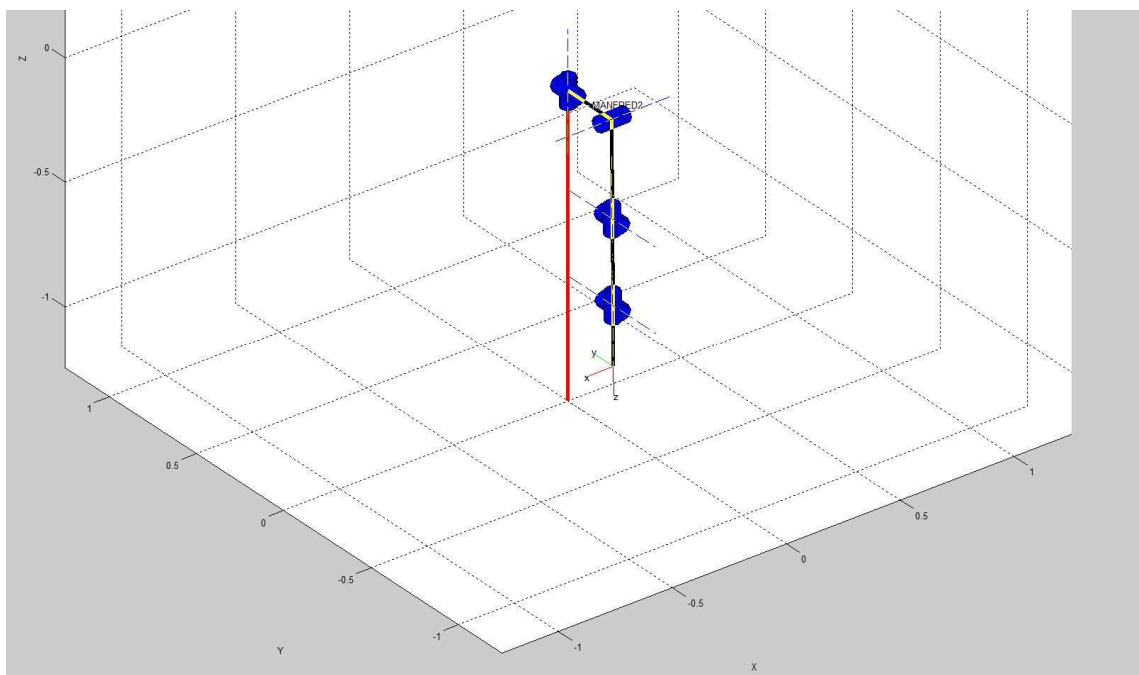


Figura 28. Posición y orientación del brazo robótico dibujada en MATLAB

- Transformamos estos datos de posición y orientación a través de la aplicación de la cinemática directa en el brazo robótico en la matriz de orientación del mismo (Figura 29).



Eliminación del efecto de la gravedad en las medidas de un sensor de fuerza-par

-0.9999	0.0016	0.0130	0.0098
0.0016	1.0000	0.0036	-0.2464
-0.0130	0.0036	-0.9999	-0.9999
0	0	0	1.0000

Figura 29. Matriz de orientación para la posición estudiada

- Obtenemos de la matriz de orientación del brazo robótico cada una de las componentes X, Y y Z de la fuerza de la gravedad en esa posición (Figura 30).

0.1298	-0.0358	9.9991
--------	---------	--------

Figura 30. Componentes de la gravedad para la posición estudiada

Como se puede observar con este ejemplo, se obtienen las componentes de la fuerza de la gravedad en los ejes del elemento de sujeción X, Y y Z. Esto se utilizará para que, en el capítulo 4, podamos descontar, mediante el método de la eliminación del efecto de la gravedad, la fuerza que causa la masa del elemento de sujeción en los datos leídos por el sensor.



4 CAPÍTULO IV: Eliminación del efecto de la gravedad



En este TFG no podemos tratar de calcular nuestro C.M de la pinza de forma matemática pura, debido a que no tenemos suficientes datos para ello, por lo tanto tenemos que buscar otra manera dentro de nuestras posibilidades. Debido a esto se hace una identificación del C.M. a lo largo del espacio de trabajo, usando el método de la identificación por mínimos cuadrados. Usamos este método debido a que tenemos una gran cantidad de datos y buscamos el menor error de cálculo posible.

4.1 Centro de masas

El centro de masas [12] de un sistema discreto o continuo es el punto geométrico que dinámicamente se comporta como si en él estuviera aplicada la resultante de las fuerzas externas al sistema. De manera análoga, se puede decir que el sistema formado por toda la masa concentrada en el centro de masas es un sistema equivalente al original.

En un tratamiento de sistemas de masas puntuales el centro de masas es el punto donde, a efectos inerciales, se supone concentrada toda la masa del sistema. El concepto se utiliza para análisis físicos en los que no es indispensable considerar la distribución de masa.

4.1.1 Cálculo matemático del C.M. de un sistema

Existen distintas situaciones, dependiendo del tipo de distribución de la masa que tengamos donde se nos puede plantear el cálculo del C.M. como pueden ser:

- Distribución discreta de materia

Para un sistema de masas discreto, formado por un conjunto de masas puntuales, el centro de masas se puede calcular como:

$$r_{cm} = \frac{\sum_i m_i r_i}{\sum_i m_i} = \frac{1}{M} \sum_i m_i r_i \quad (2)$$

m_i , masa de la partícula i-ésima.

r_i , vector de posición de la masa i-ésima respecto al sistema de referencia supuesto.



- Distribución discreta de materia

En el caso de un sistema de cuerpos cuasipuntuales, o cuerpos que distan entre sí mucho más que las dimensiones de cada uno de los cuerpos, el cálculo anterior resulta bastante aproximado.

- Distribución continua de materia

Para sistemas de masas continuos o distribuciones continuas de materia debemos recurrir al Cálculo Infinitesimal e Integral, de modo que la expresión anterior se escribe en la forma:

$$r_{cm} = \frac{\int r \, dm}{\int dm} = \frac{1}{M} \int r \, dm \quad (3)$$

o Distribución de masa homogénea

Si la masa está distribuida homogéneamente, la densidad será constante por lo que se puede sacar fuera de la integral haciendo uso de la relación siguiente:

$$dm = \rho \, dV \quad (4)$$

$$r_{cm} = \frac{\rho \int_V r \, dV}{\rho \int dV} = \frac{\int_V r \, dV}{V} \quad (5)$$

Siendo V el volumen total. Para cuerpos bidimensionales (superficies) o monodimensionales (líneas) se trabajará con densidades superficiales y longitudinales respectivamente. Para el caso de cuerpos con densidad uniforme, el C.M. coincidirá con el centroide del cuerpo.

o Distribución de masa no homogénea

Los centros de masas en cuerpos de densidad variable pueden calcularse si se conoce la función de densidad $\rho(r)$. En este caso se calcula el centro de masas de la siguiente forma.

$$r_{cm} = \frac{\int_V r \, \rho(r) \, dV}{M} \quad (5)$$

Para calcular la integral hay que conocer la función de densidad.



4.1.2 Eliminación del efecto de la masa

Cuando usamos un sensor de fuerza/par, como por ejemplo el JR3 usado en este TFG, las fuerzas f_r que este sensor lee, en cada una de las posiciones y con cada una de las masas a las que lo hemos sometido, vienen afectadas por la fuerza de gravedad g [13]. En consecuencia las fuerzas que obtenemos del sensor no son buenas para utilizar y lo que debemos hacer es extraer la fuerza de la gravedad de ellas. La ecuación de la fuerza de la gravedad f_g que actúa sobre un cuerpo de masa m y centro de masa $p = (C_x, C_y, C_z)^T$ se puede expresar de la siguiente manera:

$$f_g = \begin{pmatrix} mg \\ -mg \ x \ p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} mg \\ -m[g]_x \ p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D(g) & 0_3 \\ 0_3 & -[g]_x \end{pmatrix} * c \quad (6)$$

donde $D(g)$ es una matriz diagonal 3×3 , donde la diagonal principal está formada por las componentes de la gravedad, $D(g) = \text{diag}(g)$. Tiene esta forma:

$$D(g) = \begin{pmatrix} g_x & 0 & 0 \\ 0 & g_y & 0 \\ 0 & 0 & g_z \end{pmatrix} \quad (7)$$

$[g]_x$ es la matriz antisimétrica definida por las componentes de g y tiene esta forma:

$$[g]_x = \begin{pmatrix} 0 & g_z & -g_y \\ -g_z & 0 & g_x \\ g_y & -g_x & 0 \end{pmatrix} \quad (8)$$



Con estas dos matrices formaremos la matriz que utilizaremos para el cálculo de la ecuación 10, $D(g)_{TOTAL}$, matriz distinta para cada una de las fuerzas ya que depende de la posición del brazo, que tiene esta forma:

$$D(g)_{TOTAL} = \begin{pmatrix} g_x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & g_y & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & g_z & -g_y \\ 0 & 0 & -g_z & 0 & g_x \\ 0 & 0 & g_y & -g_x & 0 \end{pmatrix} \quad (9)$$

donde c es un vector de soluciones de la siguiente manera $c = m(1, 1, 1, c_x, c_y, c_z)^T$. Para poder eliminar la fuerza que la gravedad realiza sobre el sensor debido a la masa del elemento de sujeción, debemos de poder obtener una solución estimada de este vector c . Esto puede realizarse mediante la obtención de un conjunto de fuerzas aleatorias $f_r^0 \dots f_r^n$ que se apliquen a la pinza mediante las cuales podremos generar un conjunto de resultados validos para resolver esta ecuación mediante el método de mínimos cuadrados:

$$\begin{pmatrix} D(g^0) & 0_3 \\ 0_3 & -[g^0]_x \\ \vdots & \vdots \\ D(g^n) & 0_3 \\ 0_3 & -[g^n]_x \end{pmatrix} * c = \begin{pmatrix} f_r^0 \\ \vdots \\ f_r^n \end{pmatrix} \quad (10)$$

donde g^i es el vector de gravedad dependiendo de la posición en la que se encuentre el sensor. Cuando logremos obtener una estimación del valor de c , ya podremos calcular la fuerza real f , totalmente independiente de la fuerza generada por la masa del elemento de sujeción. Esta fuerza f puede ser calculada de la siguiente manera:

$$f = f_r - \begin{pmatrix} D(g) & 0_3 \\ 0_3 & -[g]_x \end{pmatrix} * c \quad (11)$$



4.1.3 Estimación de c mediante el análisis por mínimos cuadrados

Los mínimos cuadrados [14] es una herramienta muy utilizada desde su invención por Gauss y Legendre hacia el año 1800. En términos de álgebra lineal se trata de resolver sistemas lineales, como el de la ecuación 13, con más ecuaciones que incógnitas, donde el término a resolver se entiende en el sentido de minimizar la norma euclídea del vector residuo (ecuación 14).

El término mínimos cuadrados describe el problema que existe al intentar resolver un sistema de ecuaciones sobre-determinadas, esto es, sistemas lineales con más ecuaciones que incógnitas. En estos casos en lugar de resolver las ecuaciones de manera exacta lo que se hace es buscar una solución estimada basada en la minimización de la suma de los cuadrados de los residuos.

Se considera un sistema lineal de n ecuaciones lineales con m incógnitas:

$$\begin{pmatrix} a_{1,1} & \cdots & a_{1,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n,1} & \cdots & a_{n,m} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ x_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ b_m \end{pmatrix} \quad (12)$$

que se supone sobre-determinado, es decir, tiene más ecuaciones que incógnitas ($n > m$). En notación matricial es:

$$Ax = b \quad (13)$$

El vector residuo.

$$r = Ax - b \quad (14)$$

quizá pueda hacerse pequeño con una adecuada elección de x , pero en general será distinto de cero. Se trata de hacerlo tan pequeño como se pueda y lo que se denomina solución de mínimos cuadrados a la solución cuadrática que minimiza la norma euclídea del residuo, es decir:



Teorema 1. *Dada la matriz $A \in \mathbb{R}^{n \times m}$ con $n > m$ y el vector $b \in \mathbb{R}^n$, se quiere calcular el vector $x \in \mathbb{R}^m$ que minimice $\|Ax - b\|_2$.*

Una de las fuentes habituales de problemas de mínimos cuadrados son los problemas de ajustes de curvas. En la ciencia y la ingeniería, los experimentos producen un conjunto de datos $(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$, con las abscisas $\{x_k\}$ diferentes, y el problema que se plantea es determinar una función $y = f(x)$ que relacione los datos, lo mejor posible en algún sentido. Evidentemente, el resultado dependerá del tipo de función que se elija, por ejemplo, en la regresión $f(x) = ax + b$ es una recta, y para ajustar los parámetros libres se pueden minimizar uno de los siguientes tres valores:

El error máximo:

$$E_\infty(f) = \max\{|f(x_k) - y_k| : 1 \leq k \leq n\} \quad (15)$$

El error medio:

$$E_1(f) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |f(x_k) - y_k| \quad (16)$$

El error cuadrático medio:

$$E_2(f) = \left(\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (f(x_k) - y_k)^2 \right)^{1/2} \quad (17)$$

En el método de mínimos cuadrados el error que se minimiza es el error medio cuadrático, como se observa en la ecuación 16. Por tanto, la recta de regresión ajusta los parámetros a y b para minimizar el valor

$$E(a, b) = \sum_{k=1}^n (ax_k + b - y_k)^2 \quad (18)$$

que son la solución del sistema lineal conocido como ecuaciones normales de Gauss.



$$(\sum_{k=1}^n x_k^2)a + (\sum_{k=1}^n x_k)b = \sum_{k=1}^n x_k y_k \quad (19)$$

$$(\sum_{k=1}^n x_k)a + nb = \sum_{k=1}^n y_k \quad (20)$$

Una forma teórica de calcular una solución mínimo cuadrática de un sistema de ecuaciones es la de multiplicar por la matriz transpuesta A^T por ambos lados para obtener el llamado sistema normal:

$$A^T A x = A^T b \quad (21)$$

donde $A^T A$ es una matriz $m \times m$, es decir, que si hubiera miles de observaciones y unos pocos parámetros, el sistema normal sería pequeño y fácil de resolver. El siguiente teorema ilustra la conveniencia de resolver los sistemas normales:

Teorema 1. Sean $A \in \mathbb{R}^{n \times m}$ y $b \in \mathbb{R}^n$ dados. Un vector x es la solución del problema de mínimos cuadrados si y sólo si es solución del sistema normal (3.1). Además, la solución es única si y sólo si A tiene rango m .

Habitualmente los sistemas normales están mal condicionados porque su número de condición es muy alto (22), por ejemplo, considerando una matriz A de la siguiente forma:

$$k(A^T A) = k(A)^2 \quad (22)$$

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ \delta & 0 \\ 0 & \delta \end{pmatrix} \quad (23)$$

con δ pequeño pero no cero, sus dos columnas son linealmente independientes aunque casi paralelas. Sin embargo, la matriz del sistema normal es:

$$A^T A = \begin{pmatrix} 1 + \delta^2 & 1 \\ 1 & 1 + \delta^2 \end{pmatrix} \quad (24)$$

que para $|\delta| < 10^{-8}$ computando con aritmética de doble precisión es una matriz singular que no tiene inversa, y por lo tanto el sistema normal no tiene solución.

La conclusión de todo esto es que en la práctica los problemas de mínimos cuadrados no se pueden resolver calculando las soluciones de los sistemas normales asociados, como el de la ecuación 21, usando los algoritmos habituales.



Hay muchas formas de resolver estos sistemas sobre-determinados, como son:

- Los reflectores de Householder.
- La factorización QR de una matriz.
- La pseudoinversa de una matriz.
- La descomposición a valores singulares de una matriz.

En nuestro caso al tener una gran cantidad de datos y estos ser, en algunos casos, muy pequeños, la matriz de antisimétricas D no tiene inversa y se nos hace singular. La manera que hemos encontrado para resolver este problema es el empleo de la resolución mediante mínimos cuadrados a través del uso de la matriz pseudoinversa.

El concepto de pseudoinversa de una matriz debido a Moore y Penrose generaliza y extiende el clásico concepto de matriz inversa de una matriz cuadrada.

Sea A una matriz $n \times m$ con $n > m$, su pseudoinversa es la matriz que aparece en las ecuaciones normales

$$A^{\dagger} = (A^T A)^{-1} A^T \quad (25)$$

que es una matriz $m \times n$.

Según esta definición, si la matriz B fuera cuadrada no singular

$$B^{\dagger} = (B^T B)^{-1} B^T = B^{-1} (B^T)^{-1} B^T = B^{-1} \quad (26)$$

La matriz pseudoinversa tiene propiedades que recuerdan a la inversa como por ejemplo:

$$A^{\dagger} A = (A^T A)^{-1} A^T A = I \quad (27)$$

que indica que es la inversa por la izquierda, pero no por la derecha porque

$$A A^{\dagger} = A (A^T A)^{-1} A^T \quad (28)$$



Otra propiedad importante de la pseudoinversa es que se trata de la mejor aproximación a la inversa por la derecha en el sentido de que minimiza el residuo con respecto a la forma de Frobenius. La forma de Frobenius de la matriz A se define de la siguiente forma:

$$||A||_F = (\sum_i \sum_j a_{i,j}^2)^{1/2} \quad (29)$$

y lo que se demuestra es que

$$A^\dagger = \min_Z ||AZ - I||_F \quad (30)$$

En lo que a este TFG respecta y para lo que la vamos a utilizar es para la obtención de una solución del sistema sobre-determinado mediante mínimos cuadrados. Conocida la pseudoinversa de nuestra matriz, en nuestro caso, la matriz de antisimétrica D, la solución del sistema se reduce a un simple producto matricial:

$$x = (A^T A)^{-1} A^T b = A^\dagger b \quad (31)$$

La resolución mediante el ajuste por mínimos cuadrados se puede llevar a cabo en MATLAB, ya que este posee funciones o comandos directos que permiten el cálculo rápido y fácil del resultado de la ecuación 10 colocando las variables que el programa te pida en el orden correcto. Para este apartado hemos comprobado que dos de las funciones que utiliza MATLAB para resolver este problema coinciden como es lógico con nuestro resultado obtenido mediante el método matemático resolviendo así la ecuación 31.

Una vez hayamos obtenido el resultado de la ecuación 31 y, como vimos en el capítulo 3, sepamos cual es el valor de las componentes de la gravedad para cada uno de los datos extraídos del sensor, ya podemos realizar la eliminación de la fuerza de la gravedad generada por la masa del elemento de sujeción.



5 CAPÍTULO V: RESULTADOS Y CONCLUSIONES

5.1 Resultados

Una vez acabado todo el análisis de datos, la transformación de los mismos y la elaboración de una ecuación que nos permitirá eliminar el efecto de la gravedad en las medidas del sensor JR3, solo nos queda comprobar que lo calculado teóricamente funciona realizando algunas pruebas. Con estas pruebas comprobaremos como responde el robot ante una masa colocada en el extremo del elemento de sujeción.

Como se dijo anteriormente en este TFG, el brazo robótico debe de ser capaz de controlar la fuerza y par que se le aplica para poder realizar unas tareas óptimas de manipulación. El objetivo es por lo tanto, leer esa fuerza y par totales, compuestos por la fuerza y el par generados por la masa del elemento de sujeción y la fuerza y par generados por una acción externa independiente al brazo robótico, como puede ser, unas pesas que este haya agarrado o la colisión del brazo robótico contra algo no movable, y descartar de esa fuerza y par totales lo generado por el elemento de sujeción, quedando solo en las medidas del sensor la fuerza y el par externos aplicados sobre el mismo.

Para simular el este proceso, hacemos que el robot sujete distintos pesos (ver Figura 31) en una posición concreta.

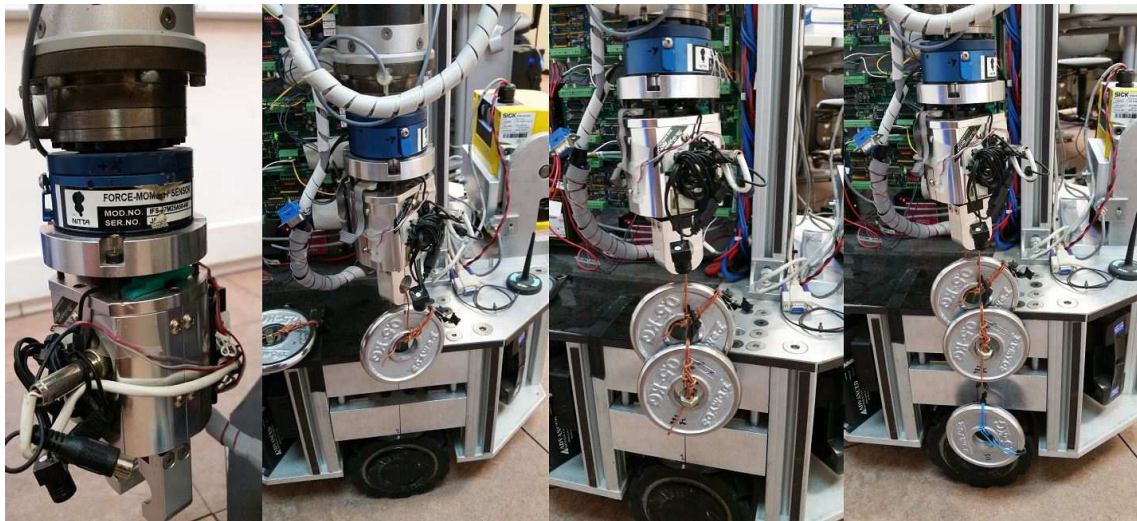


Figura 31. Posición, orientación y masas para la prueba y obtención de resultados.

Comprobamos mediante la ecuación 11 si se produce la eliminación de la masa del elemento de sujeción en los resultados finales. Esto nos da una f resultante que se trata de la resta entre la f_r (fuerza y par totales leídos por el sensor) y la compensación de la fuerza de gravedad para el elemento de sujeción.



5.2 Conclusiones

Una vez obtenida la fuerza y par resultantes f , podemos utilizarla para saber que masa se ha añadido al elemento de sujeción, proporcionando al robot una información de fuerza y par que podrá utilizar más adelante para realizar funciones de manipulación de manera controlada.

Calculada la masa actual (suma del elemento de sujeción y fuerza externa aplicada sobre este) y realizando un proceso inverso con la ecuación 11, es decir, sabiendo la nueva masa y la fuerza que el sensor JR3 está leyendo (f_r), obtenemos la posición del nuevo C.M. del elemento de sujeción.

Gracias a la obtención de la masa y el C.M. anteriores, el brazo robótico tiene suficiente información como para compensar las fuerzas y pares externos ejercidos sobre el elemento de sujeción, pudiendo así mantener el equilibrio o realizar funciones tales como, mover una puerta de manera controlada, detectar si está tropezando con algo que no puede mover, coger un objeto y manipularlo de la forma deseada etc.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] Web del Robotics Lab en <http://roboticslab.uc3m.es/roboticslab>. Última consulta: “24 de septiembre de 2014”.
- [2] Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica. Vol. 9, N.º 3, pp. 33-48, 2005 “*MANFRED: Robot antropomórfico de servicio fiable y seguro para operar en entornos humanos*”, Dolores Blanco, Salah Al Ansari, Cristina Castejón, Beatriz López Boada, Luis E. Moreno, Universidad Carlos III de Madrid
- [3] D. Salah Hassan Kadhim Al Ansari “*Metodología para el Desarrollo de un Manipulador Móvil Autónomo con Características Antropométricas*” Universidad Carlos III de Madrid, Tesis Doctoral, 2011.
- [4] García de Jalón, Javier. Rodríguez, José Ignacio. Vidal, Jesús: “*Aprenda Matlab 7.0 como si estuviera en primero*”. (Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Madrid. 2005).
- [5] Baterías PS. http://www.power-sonic.com/ps_psg_series.php. Última consulta: “24 de septiembre de 2014”.
- [6] <http://es.scribd.com/doc/114803384/SENSORES-ELASTICOS>. Última consulta: “24 de septiembre de 2014”.
- [7] Carlos de la Hoz Najarro, “*Puesta en marcha del sensor fuerza/par JR3*”, Universidad Carlos III de Madrid, Proyecto Fin de Carrera, 2011.
- [8] Marca JR3. <http://jr3.com/info/about.php>. Última consulta: “24 de septiembre de 2014”.
- [9] Sensores JR3. <http://jr3.com/products/products.html>. Última consulta: “24 de septiembre de 2014”.
- [10] <http://jr3.com/documents/files/datasheets/spec%20sheet%2067M25x3%20SI.pdf>. Última consulta: “24 de septiembre de 2014”.
- [11] http://www.hoskin.qc.ca/uploadpdf/Instrumentation/divers/Hoskin/divers_Recepteur%20PCI-BUS_41362e854c401.pdf. Última consulta: “24 de septiembre de 2014”.
- [12] Wikipedia, centro de masas., http://es.wikipedia.org/wiki/Centro_de_masas. Última consulta: “24 de septiembre de 2014”.
- [13] F. Vadillo “*PROBLEMAS DE MÍNIMOS CUADRADOS*” Dep. Matemática Aplicada y Estadística de la Universidad del País Vasco.
- [14] Mario Prats, Ángel P. del Pobil, Pedro J. Sanz, “*Robot Physical Interaction through the combination of Vision, Tactile and Force Feedback*”, 2012.



ANEXO A: PLANIFICACIÓN Y PRESUPUESTO

En el presente anexo se calculará el coste del valor del TFG presentado a lo largo del documento, detallando cada coste por separado. A esto se le añadirá la planificación que se llevo a cabo en cuanto a la repartición de las horas de trabajo para cada una de las etapas del TFG.

A.1. Planificación y costes personales

En este apartado analizaremos las horas que fueron necesarias para la realización de cada una de las partes del TFG así como el coste que supusieron esas horas tanto para el ingeniero y el director del proyecto (Tabla 4).

Para la división del proyecto en apartados se ha seguido la siguiente estructura:

- **Trabajo previo.** Incluye las bases teóricas a las que se tuvo que acceder para que el TFG pudiera empezar a tomar forma (50 h).
- **Diseño del código.** Incluyen los apartados referentes a la creación del código, tanto investigación previa del mismo para saber que funciones utilizar, como el tiempo destinado al desarrollo del mismo (145 h).
- **Pruebas.** Incluye todas las horas dedicadas a pruebas tales como, la generación de los datos a partir de MANFRED, la obtención de un resultado a través del código generado y el análisis de este resultado (75 h).
- **Memoria.** Incluye el tiempo dedicado a la escritura de la misma y a su posterior corrección (90 h).



	Concepto	Director de proyecto	Ingeniero
Trabajo Previo	Teoría de sensores fuerza/par (h)	0	25
	Teoría de MANFRED (h)	0	25
Diseño del código	Investigación (h)	0	35
	Desarrollo (h)	15	110
Pruebas	Generación de datos (h)	20	30
	Obtención de resultado (h)	5	30
	Análisis de resultados (h)	5	15
Memoria	Elaboración (h)	0	75
	Corrección (h)	25	15
Total	Total (h)	70	360
	Salario/hora (€)	50	30
	Salario total (€)	3500	10800
	Total (€)	14300	

Tabla 4. Desglose de la planificación y el coste personal.

A.2. Costes materiales

Dentro de los costes materiales incluimos el coste de elementos que se han usado durante el desarrollo del TFG aunque no se hayan comprado explícitamente para este. Para el desarrollo de este TFG se han utilizado, un portátil de gama alta para la búsqueda de información previa, el desarrollo del algoritmo y las pruebas, un sensor JR3 67M25A3-U560 instalado en el brazo robótico. Considerando un periodo de amortización de 3 años para cada uno de los elementos y teniendo en cuenta que la duración del TFG fue de 4 meses, los costes materiales quedan reflejados en la Tabla 5.



Eliminación del efecto de la gravedad en las medidas de un sensor de fuerza-par

	Concepto	Coste (€)	Coste del TFG (€)
Hardware	Ordenador portátil altas prestaciones	1000	111.11
	Sensor JR3 67M25A3-U560	4600	511.11
Software	Licencia de Matlab	200	22.22
Total (€)			744.44

Tabla 5. Costes materiales.

A.3. Costes totales

Poniendo en conjunto los dos apartados anteriores, los costes indirectos (veinte por ciento) y el IVA (veintiuno por ciento), el TFG tiene un coste total reflejado en la Tabla 6.

	Coste (€)
Personal	14300.00
Materiales	744.44
Costes indirectos (20%)	3008.88
Subtotal	18053.33
IVA (21%)	3791.20
Total	21844.52

Tabla 6. Resumen de los costes totales.

El coste total del TFG es de VEINTIÚN MIL OCHOCIENTOS CUARENTA Y CUATRO EUROS Y CIENTO Y DOS CÉNTIMOS.

Leganés, 24 de Septiembre del 2014

El ingeniero